

文章编号: 1000-7032(2016)04-0452-05

## GaN 基蓝光 VCSEL 的制备及光学特性

蔡丽娥<sup>1 2\*</sup>, 张保平<sup>3</sup>, 张江勇<sup>3</sup>, 沈汉鑫<sup>1 2</sup>, 朱文章<sup>1 2</sup>

(1. 厦门理工学院 光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024;

2. 福建省光电信息材料与器件重点实验室, 福建 厦门 361024;

3. 厦门大学信息学院 电子系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 利用金属有机物气相沉积技术(MOCVD)在(0001)蓝宝石衬底上生长了 GaN 基垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的多量子阱腔层结构。X 射线衍射测量显示该多量子阱具有良好周期结构和平整界面。运用键合及激光剥离技术将该外延片制作成 VCSEL, 顶部和底部反射镜为极高反射率的介质膜分布布拉格反射镜 (DBR)。在室温、紫外脉冲激光的泵浦条件下, 观察到了 VCSEL 明显的激射现象, 峰值波长位于 447.7 nm, 半高宽为 0.11 nm, 自发辐射因子约为  $6.0 \times 10^{-2}$ , 阈值能量密度约为  $8.8 \text{ mJ/cm}^2$ 。在大幅度降低制作难度的情况下, 得到目前国际最好结果同样数量级的激射阈值。降低器件制作难度有利于制备的重复性, 有利于器件的产品化。

**关键词:** 氮化镓; 垂直腔面发射激光器; 激光剥离技术; 光泵浦; 激射

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20163704.0452

## Fabrication and Characteristics of GaN-based Blue VCSEL

CAI Li-e<sup>1 2\*</sup>, ZHANG Bao-ping<sup>3</sup>, ZHANG Jiang-yong<sup>3</sup>, SHEN Han-xin<sup>1 2</sup>, ZHU Wen-zhang<sup>1 2</sup>

(1. School of Optoelectronics & Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Information Materials & Devices, Xiamen 361024, China;

3. Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

\* Corresponding Author, E-mail: liecai@xmut.edu.cn

**Abstract:** GaN-based multiple quantum wells (MQWs) were epitaxially grown on (0001)-oriented sapphire substrate by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) technique. X-ray diffraction measurements indicated that the MQWs had good periodic structure and smooth interface. By employing bonding and laser lift-off techniques, the MQW structure was sandwiched between two high reflectivity dielectric distributed Bragg reflectors (DBRs), forming a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL). Under optical pumping, the VCSEL achieved laser action at room temperature with a threshold pumping energy density of about  $8.8 \text{ mJ/cm}^2$ . The laser emitted a blue light at 447.7 nm with a narrow linewidth of 0.11 nm, and had a high spontaneous emission factor of about  $6.0 \times 10^{-2}$ .

**Key words:** GaN; VCSEL; laser lift-off; optical pumping; lasing

收稿日期: 2015-12-17; 修订日期: 2016-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61307115); 福建省教育厅 A 类科技项目(JA12249); 厦门理工学院高校高层次人才基金(YKJ11026R); 福建省自然科学基金(2013J05104)资助项目

## 1 引言

本世纪以来, GaN 基光电子器件正经历快速发展阶段, 其中 LED 和边发射激光器已经实现产业化, 但是具有更优越特性的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 仍处于实验室研究阶段。垂直腔面发射激光器的独特优点包括阈值电流低、易实现单纵模工作、调制频率高、发散角度小、圆形光斑、易与光纤耦合、易实现高密度二维阵列及光电集成等。VCSEL 凭借以上优势, 在高密度光存储、激光显示、激光打印、照明、光互连、光交换及水陆通信等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。然而, 由于自身结构的特殊性, 其激射条件非常苛刻。由于其腔长短, 仅几微米长, 所以单程增益长度极短, 不但要求制作的材料质量良好, 还要求反射镜的反射率极高, 通常要求达到 99% 以上。除此之外, 还要确保其发光波长落在分布布拉格反射镜 (DBR) 的高反带之内, 确保谐振腔的谐振波长与有源区的增益峰对准等才能得到激射, 所以制备十分困难。

然而, GaN 系列材料由于自身固有的特性, 相互之间折射率差较小, 所以制作的氮化物 DBR 高反带带宽较窄; 并且 GaN 基材料 (包括 GaN、AlN、InN 及其三元合金) 之间存在着较大的晶格失配, 生长高质量的氮化物 DBR 非常困难; 另外, GaN 材料熔点高、硬度大、化学性质稳定, 难以采用机械研磨和化学腐蚀的方法对其厚度进行大幅调节, 使得光腔的谐振波长与有源区增益的峰值波长匹配难度较大。从 2000 年开始, 陆续有研究小组实现了光泵激射<sup>[1-7]</sup>; 2008 年以来, 中国台湾、日本、美国、瑞士、中国厦门大学等 7 个研究小组相继实现了电注入的突破<sup>[8-14]</sup>。但是, 由于器件制备的复杂性和激射条件的苛刻性, 所以制备的重复性较差, 器件离实用化还有相当长的距离, GaN 基 VCSEL 的研究还处于初始阶段, 还需要不断的努力。

本研究通过合理设计 VCSEL 的器件结构, 运用键合及激光剥离技术, 制备了 GaN 基双介质膜 DBR 蓝光 VCSEL, 实现了室温光泵浦激射, 测量了在不同激发光强度下的发射谱线, 并对其激射特性进行了分析。

## 2 实验

图 1 为具有双介质膜 DBR 的蓝光 VCSEL 结构示意图。激光器的设计波长  $\lambda$  为 450 nm。VC-

SEL 的结构主要分为 3 部分, 底部和顶部是周期数为 13.5 对的高反射率  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  介质膜 DBRs, 中间是光学厚度约为 21.5 个波长的腔层。介质膜 DBRs 高反射带的反射率大于 99.5%, 阻带宽度约为 80 nm。GaN 基蓝光 VCSEL 腔层部分采用金属有机物气相沉积技术在 (0001) 晶向蓝宝石衬底 (直径 2 in) 上生长, 具体结构包括: 30 nm 厚低温 GaN 成核层; 2.2  $\mu\text{m}$  厚 GaN 缓冲层; 厚度为 0.71  $\mu\text{m}$  的上下  $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$  包层; 208 nm 厚 InGaN/GaN 多量子阱有源增益区; 120 nm GaN 顶层。其中, 有源增益区为 16 对  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$  多量子阱, 阱层厚 3 nm, 垒层厚 10 nm, 总厚度大约对应 1 个波长光学厚度, 因此肯定有量子阱落在谐振腔内的光场波峰上, 解决了量子阱有源区与光场波峰匹配的问题。整个 VCSEL 结构制备工艺流程为: 在外延样品表面溅射  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  介质膜 DBR, 采用键合技术把沉积完介质膜的表面键合到石英衬底, 再运用激光剥离技术去除蓝宝石衬底, 最后在激光剥离后露出的 GaN 面上沉积第 2 个  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  DBR, 完成器件制作。

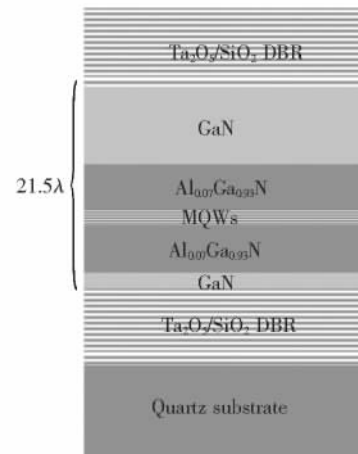


图 1 具有双介质膜分布布拉格反射镜的垂直腔面发射激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GaN-based VCSEL with dielectric DBRs

利用 X 射线衍射对外延片结构进行测量。利用紫外-可见分光光度计测量介质膜 DBR 的反射率。以 YAG 激光器的三倍频脉冲光 (355 nm) 作为激发源对器件的激射特性进行分析。通过 CCD 光谱仪采集光谱信号。

## 3 结果与讨论

图 2 为器件外延结构 (0002) 面在  $\omega-2\theta$  扫描

方式下的双晶 X 射线衍射曲线。中间衍射主峰的半峰宽为 462 arcsec。本结构的 GaN 势垒层厚度较薄,但是衍射曲线依然明显表现出 InGaN/GaN 量子阱的卫星峰结构,表明腔层的多量子阱周期结构良好且界面平整。本测试设备的 X 射线波长为 0.154 056 nm,衍射角  $\theta = 17.2846^\circ$ ,图中两个卫星峰之间的间距为 1 281 arcsec。通过公式  $D = \lambda / (2\Delta\theta \cos\theta)$  可以计算出多量子阱的周期厚度,把测量结果  $\Delta\theta = 1 281$  arcsec 代入,算得厚度  $D = 12.996$  nm,这与预设情况基本一致。

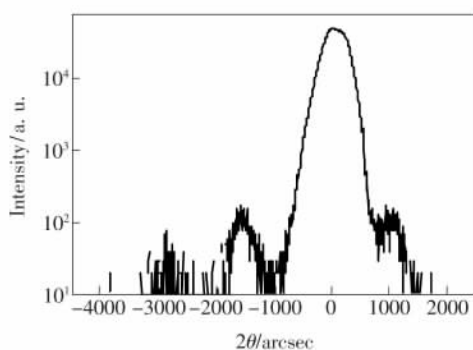


图 2 器件外延结构(0002)面的  $\omega$ - $2\theta$  扫描方式下的衍射强度分布图

Fig. 2  $\omega$ - $2\theta$  XRD scan curve of the (0002) crystal plane of the device epitaxial structure

以上测试结果表明,器件外延结构样品的多量子阱周期结构良好且界面平整。

图 3 (a) 给出了 VCSEL 发射谱线强度随泵浦光能量的变化,测量温度为室温。蓝光 VCSEL 的激发光源采用 YAG 激光器三倍频的脉冲光 355 nm,脉冲宽度为 5 ns,频率为 50 Hz。从图中可以清晰观察到,器件的发光谱强度随泵浦光能量的增加而越来越大。在泵浦光能量达到阈值能量以上时,发光谱出现一个半高宽约为 0.11 nm 的尖锐发光峰,峰值波长为 447.7 nm,其发光强度随泵浦光能量的增加而急剧增大。这一结果显示器件实现了光泵浦条件下的室温激光发射。在发光谱的左边有一条发光较弱的峰,峰值波长位于 446.31 nm,与激光谱 447.7 nm 间隔为 1.69 nm。根据谐振腔光学长度估算,纵模间距约为 10.5 nm。因为两个发光峰之间的距离不满足纵模间距,所以左边的弱发光峰可能是由于量子阱中组分不均匀导致的,这种情况也出现在文献 [15] 的结果中。

图 3 (b) 为器件激光峰的发光强度随泵浦激

光能量的变化曲线。图中显示,器件存在一个明显的阈值。当泵浦激光能量在阈值能量以下时,器件的发光很弱;而在阈值能量以上时,发光强度急剧增大。激光阈值能量为 2  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ ,其对应的阈值能量密度约为 8.8  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。与其他研究小组的光泵浦激光结果<sup>[1-7]</sup>相比,这一结果已达到目前报道阈值的最低量级。

图 4 为双对数坐标下器件发光强度随激发光

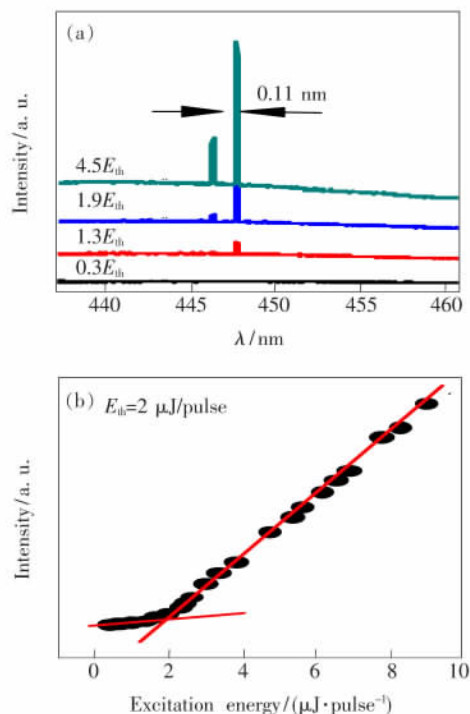


图 3 (a) 蓝光 VCSEL 样品在不同激发光强度下的发射谱线; (b) 发光强度随泵浦激光能量的变化曲线。

Fig. 3 (a) Emission spectra at various pumping energies. (b) Emission intensity as a function of pumping energy per pulse. The threshold of the device is 2  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ .

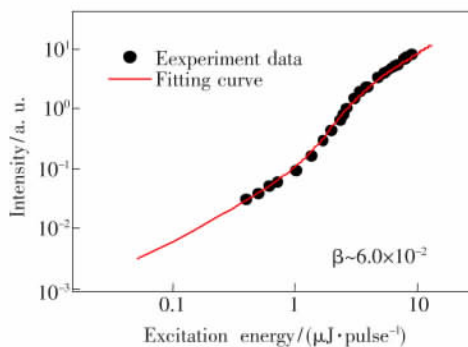


图 4 双对数坐标下的样品发光强度随激发能量的变化曲线

Fig. 4 Emission intensities from Fig. 3 (b) replotted in a double logarithmic scale

能量的变化曲线。在半导体激光器中,进入一个模式的自发发射光子数占总自发辐射光子数的比例为这个模式的自发发射因子,反映了自发发射谱耦合进入激射模式中的比例,是衡量激光器性能的一个重要参数。自发发射因子的数值可以从激射光能量随激发光能量的变化中得出,在忽略透明载流子密度的情况下,其自发发射因子可以利用公式<sup>[16-17]</sup>:

$$I_{\text{out}} = I_0(r-1) + \sqrt{(r-1)^2 + 4\beta r}, \quad (1)$$

进行拟合。其中  $I_{\text{out}}$  为激光发光强度,  $I_0$  为一常数  $r = \frac{E_{\text{th}}}{E}$ ,  $E_{\text{th}}$  为阈值能量,  $E$  为泵浦光能量,  $\beta$  代表自发发射因子。在器件阈值能量为  $2 \mu\text{J}/\text{pulse}$  的情况下,可以拟合得到自发发射因子为  $6.0 \times 10^{-2}$ 。这个结果比边发射激光器的自发发射因子 ( $10^{-3} \sim 10^{-5}$ ) 大了约 2 个数量级,主要是由于谐振腔的腔长极大地减短了,使腔内光子态密度增大,微腔的量子电动力学效应导致进入激光模式中的自发辐射光子数目大大增加。

我们曾经报道了与本研究波长相近同属于蓝光波段激射的结果<sup>[7]</sup>,发光波长位于  $449.5 \text{ nm}$ , 阈值为  $6.5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。其中利用了非对称耦合量子阱有源区结构,减小器件的谐振腔长以及量子阱个数,使增益匹配及载流子利用率得到了改善,也得到了比较低的激射阈值。但是这种方法必须精确控制生长层厚度,增加了外延生长的难度。

目前,光泵浦激射最好的结果是厦门大学 Liu 等<sup>[18]</sup>在 2015 年报道的阈值为  $1.2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 、峰值波长为  $423.7 \text{ nm}$  的结果。其中除了运用激光剥离技术去除外延片上的蓝宝石衬底外,还利用 ICP 刻蚀技术减少腔长,利用化学抛光处理激光剥离后的 GaN 表面,使表面达到纳米级别的粗糙度,进一步降低了激射阈值。而本研究使用普通多量子阱结构,省略了 ICP 和抛光两个繁杂步骤,在大幅度降低制作难度的情况下,得到了同样数量级的激射阈值。

## 4 结 论

用 MOCVD 生长了高质量的 GaN 基垂直腔面发射激光器腔层结构,有源增益区为长周期的 In-GaN/GaN 多量子阱。X 射线衍射测量显示,多量子阱周期结构良好且界面平整。通过键合及激光剥离技术,用该外延片制作了 VCSEL,反射镜为极高反射率的介质膜 DBR。GaN 基 VCSEL 在室温、光泵浦条件下观察到了激射,峰值波长为  $447.7 \text{ nm}$ ,半高宽为  $0.11 \text{ nm}$ ,自发辐射因子约为  $6.0 \times 10^{-2}$ ,阈值能量密度约为  $8.8 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。本研究在大幅度降低制作难度的情况下,得到了与目前国际最好结果同样数量级的激射阈值。降低器件制作难度有利于制备的重复性,有利于器件的产品化。本研究为优化电注入 VCSEL 提供了有益的参考。

## 参 考 文 献:

- [1] SOMEYA T, WERNER R, FORCHEL A, et al. Room temperature lasing at blue wavelengths in gallium nitride micro-cavities [J]. *Science*, 1999, 285(5435): 1905-1906.
- [2] SONG Y K, ZHOU H, DIAGNE M, et al. A quasicontinuous wave, optically pumped violet vertical cavity surface emitting laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76(13): 1662-1664.
- [3] TAWARA T, GOTOH H, AKASAKA T, et al. Low-threshold lasing of InGaN vertical-cavity surface-emitting lasers with dielectric distributed Bragg reflectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(5): 830-832.
- [4] KAO CC, PENG Y C, YAO H H, et al. Fabrication and performance of blue GaN-based vertical-cavity surface emitting laser employing AlN/GaN and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> distributed Bragg reflector [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(8): 081105.
- [5] FELTIN E, CHRISTMANN G, DORSAZ J, et al. Blue lasing at room temperature in an optically pumped lattice-matched AlInN/GaN VCSEL structure [J]. *Electron. Lett.*, 2007, 43(17): 924-926.
- [6] CAI L E, ZHANG J Y, ZHANG B P, et al. Blue-green optically pumped GaN-based vertical cavity surface emitting laser [J]. *Electron. Lett.*, 2008, 44(16): 972-974.
- [7] ZHANG J Y, CAI L E, ZHANG B P, et al. Low threshold lasing of GaN-based vertical cavity surface emitting lasers with an asymmetric coupled quantum well active region [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(19): 191118.

- [ 8 ] LU T C , KAO C C , KUO H C , *et al.* . CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting laser [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2008 , 92( 14 ) : 141102-1-3.
- [ 9 ] HIGUCHI Y , OMAE K , Matsumura H , *et al.* . Room-temperature CW lasing of a GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser by current injection [J]. *Appl. Phys. Express* , 2008 , 1( 12 ) : 121102-1-3.
- [10] ONISHI T , IMAFUJI O , NAGAMATSU K , *et al.* . Continuous wave operation of GaN vertical cavity surface emitting lasers at room temperature [J]. *IEEE J. Quant. Electron.* , 2012 , 48( 9 ) : 1107-1112.
- [11] COSENDEY G , CASTIGLIA A , ROSSBACH G , *et al.* . Blue monolithic AlInN-based vertical cavity surface emitting laser diode on free-standing GaN substrate [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2012 , 101( 15 ) : 151113.
- [12] HOLDER C , SPECK J S , DENBAARS S P , *et al.* . Demonstration of nonpolar GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Express* , 2012 , 5( 9 ) : 092104.
- [13] LIU W J , HU X L , YING L Y , *et al.* . Room temperature continuous wave lasing of electrically injected GaN-based vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2014 , 104( 25 ) : 251116-1-4.
- [14] IZUMI S , FUUTAGAWA N , HAMAGUCHI T , *et al.* . Room-temperature continuous-wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated using epitaxial lateral overgrowth [J]. *Appl. Phys. Express* , 2015 , 8( 6 ) : 062702.
- [15] CHU J T , LU T C , YOU M , *et al.* . Emission characteristics of optically pumped GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2006 , 89( 12 ) : 121112-1-3.
- [16] BJORK G , YAMAMOTO Y . Analysis of semiconductor microcavity lasers using rate equations [J]. *IEEE J. Quant. Electron.* , 1991 , 27( 11 ) : 2386-2396.
- [17] HOROWICZ R J , HEITMANN H , KADOTA Y , *et al.* . GaAs microcavity quantum-well laser with enhanced coupling of spontaneous emission to the lasing mode [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 1992 , 61( 4 ) : 393-395.
- [18] LIU W J , HU X L , YING L Y , *et al.* . On the importance of cavity-length and heat dissipation in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Sci. Rep.* , 2015 , 5: 9600-1-7.



蔡丽娥( 1975 - ) ,女,福建莆田人,  
博士,讲师,2011 年于厦门大学获  
得博士学位,主要从事半导体光电  
子器件方面的研究。

E-mail: liecai@xmut.edu.cn